

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ПОСТОРОННЕГО ПРЕДМЕТА, ВЫЛЕТАЮЩЕГО ИЗ-ПОД КОЛЕСА ШАССИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

*Марков Д.С., Нескоромный Е.В., Чернопятова С.А.
Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж*

Ключевые слова: вылет из-под колеса шасси, посторонний предмет, повреждения посторонними предметами, защищенность двигателей.

Аннотация. В работе представлен анализ проблемы преждевременного съема с эксплуатации авиационных двигателей и лопастей воздушных винтов, в результате воздействия посторонних предметов, а также рассмотрены основные способы попадания посторонних предметов на вход в силовую установку. На основании анализа проблемы предложена математическая модель движения постороннего предмета, вылетающего из-под колеса шасси. Математическая модель отличается от известных, учетом влияния на место отделения постороннего предмета относительной скорости его движения в материале протектора шины колеса. Математическая модель позволяет на основании данных о параметрах шасси летательного аппарата, условий эксплуатации и параметрах посторонних предметов, находящихся на поверхности аэродрома рассчитать начальные условия движения постороннего предмета в момент его отделения от поверхности колеса шасси, а именно, абсолютную скорость и координаты места отделения от поверхности шины.

MATHEMATICAL MODEL OF THE MOVEMENT OF A FOREIGN OBJECT FLYING OUT FROM UNDER THE WHEEL OF THE AIRCRAFT CHASSIS

*Markov D.S., Neskromniy E.V., Chernopyatova S.A.
Military Educational and Scientific Center of the Air Force
«N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh*

Keywords: departure from under the landing wheel, outside object, damage by outside objects, engine protection.

Abstract. The paper proposes a mathematical model that allows, based on data on the parameters of the landing gear of the aircraft, operating conditions and parameters of foreign objects located on the surface of the airfield, to calculate the initial conditions for the movement of a foreign object at the time of its separation from the surface of the landing gear wheel, namely, the absolute speed and coordinates of the place separation from the tire surface. Based on the analysis of the problem, a mathematical model of the movement of a foreign object flying out from under the chassis wheel is proposed. The mathematical model differs from the known ones, taking into account the influence of the relative speed of its movement in the tread material of the wheel tire on the place of separation of a foreign object. The mathematical model allows, based on data on the parameters of the aircraft landing gear, operating conditions and parameters of foreign objects located on the surface of the airfield, to calculate the initial conditions for the movement of a foreign object at the time of its separation from the surface of the landing gear wheel, namely, the absolute speed and coordinates of the place of separation from the surface of the tire.

Введение. Проблема преждевременного съема с эксплуатации авиационных двигателей и лопастей воздушных винтов, в результате воздействия посторонних предметов (ПП) была и остается актуальной для самолетов, оснащаемых газотурбинными и турбовинтовыми двигателями. В среднем, с ростом пассажирооборота гражданской авиации за год на 40-60% (111 миллионов человек), процент преждевременно снятых двигателей и лопастей воздушных винтов увеличивается на 8-10% [1]. Это приводит к вынужденным простоям авиационной техники и сопровождается значительными материальными затратами на ремонт двигателей, не выработавших установленный ресурс. В этой связи также становятся актуальными вопросы разработки мероприятий, направленных на защиту элементов силовых установок (СУ) от воздействия ПП.

Под ПП понимаются металлические и неметаллические тела, попадание которых способно привести к недопустимым повреждениям элементов авиационных СУ. Такие ПП

могут попасть в СУ следующими способами: вихревой заброс на вход в СУ при работе двигателя у земли; выброс из-под колес шасси на этапах взлета, посадки и руления; заброс реактивными струями при взлете парой или проруливание мест стоянки летательных аппаратов; заброс при использовании реверса тяги на пробеге самолета после посадки и др.

В рамках данной работы, в качестве основного способа, рассматривается выброс ПП из-под колес шасси. Так как, анализ практических и теоретических исследований, выполненных специалистами научных школ, сформированных в ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского (г. Москва), ЛИИ имени М.М. Громова (г. Жуковский) и др. [1-8], в области защиты СУ от воздействия ПП показал, что большинство авторов приходит к выводу, что одним из основных способов попадания ПП на вход в СУ является вылет ПП из-под колес шасси. Разработке направлений защиты СУ от воздействия ПП вылетающих из-под колес шасси посвящены работы А.И. Евдокимова, А.Н. Горского, А.А. Комова, Н.С. Ларионовой, А.П. Назарова, В.Д. Орехова, И.А. Розенфельд, Б.И. Семона, D. MacManus, J. Murphy, Y. Yang и др. При этом существующие математические модели, входящие в состав методик оценки защищенности СУ от воздействия ПП, не учитывают кинематические параметры движения ПП в материале протектора шины, в частности суммарную скорость выхода ПП из контакта с шиной и угловую координату места отделения ПП от поверхности шины, что существенно влияет на расчет траектории ПП после его отделения от поверхности шины и последующую оценку вероятности попадания ПП в СУ.

Таким образом, **целью** работы является разработка математической модели движения ПП, вылетающего из-под колеса шасси летательного аппарата (ЛА).

С помощью предложенной математической модели определяются начальные условия движения ПП в момент его отделения от поверхности колеса шасси, а именно, абсолютная скорость ПП и координата места отделения ПП от поверхности шины. В последующем, полученные результаты могут быть использованы при оценке стойкости элементов СУ к воздействию ПП. Подобные исследования проводятся с использованием специальных баллистических стендов, таких, например, как стенд созданный на базе 73 кафедры «Авиационных двигателей» ВУНЦ ВВС «ВВА» [9].

Постановка задачи. Требуется разработать математическую модель движения постороннего предмета, вылетающего из-под колеса шасси ЛА, позволяющую на основании исходных данных о параметрах шасси ЛА и ПП, определить скорость ПП $\vec{V}_{ПП}$ и координаты его отделения от поверхности колеса x, y – в абсолютной системе координат.

Разработка математической модели. В первую очередь необходимо отметить, что движение ПП от момента наезда на него колеса шасси и до момента отделения от колеса относится к сложному (составному) движению, которое, как известно, состоит из относительного и переносного.

Относительное – это движение постороннего предмета относительно колеса (так как посторонний предмет погружается в материал протектора шины), а переносное – это движение самого колеса.

Скорость ПП в сложном движении $\vec{V}_{ПП}$ определяется как геометрическая сумма векторов скорости относительного и переносного движений (рис. 1):

$$\vec{V}_{ПП} = \vec{V}_{отн} + \vec{V}_{пер}, \quad (1)$$

где $\vec{V}_{отн}$ – относительная скорость ПП;

$\vec{V}_{пер}$ – переносная скорость ПП.

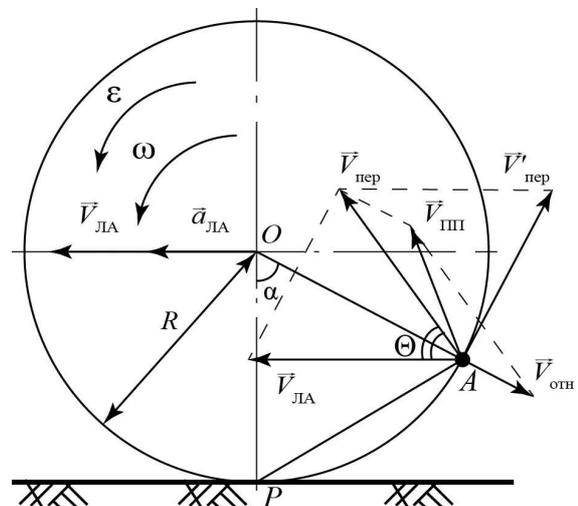


Рис. 1. Схема скоростей, возникающих в результате воздействия сил на ПП

При этом переносное движение представляет собой плоскопараллельное движение колеса, которое состоит из поступательного движения вместе с ЛА и вращательного движения относительно оси колеса.

Начальными условиями для математической модели являются: скорость летательного аппарата – $V_{\text{ЛА}}$, м/с; радиус колеса шасси – R , м; диаметр ПП – $d_{\text{ПП}}$, м; масса ПП – $m_{\text{ПП}}$, кг; посадочная скорость ЛА – $V_{\text{пос}}$, м/с; скорость отрыва ЛА – $V_{\text{отр}}$, м/с; время разбега ЛА – $t_{\text{разб}}$, с; время пробег ЛА – $t_{\text{пр}}$, с.

В первую очередь определяются кинематические характеристики переносного движения ПП. Так, угловая скорость вращения колеса ω , определяется по формуле:

$$\omega = \frac{V_{\text{ЛА}}}{R}, \quad (2)$$

где $V_{\text{ЛА}}$ – скорость летательного аппарата, м/с; R – радиус колеса, м.

Ускорение ЛА $a_{\text{ЛА}}$ определяется на основании данных о скорости отрыва ЛА и времени разбега при взлете, или посадочной скорости и времени пробег ЛА при посадке ЛА (движение ЛА принимается равнопеременным), следующим образом:

$$a_{\text{ЛА}} = \frac{V_{\text{отр}}}{t_{\text{разб}}}; \quad a_{\text{ЛА}} = \frac{V_{\text{пос}}}{t_{\text{пр}}}, \quad (3)$$

где $V_{\text{отр}}$ – скорость отрыва ЛА, м/с; $V_{\text{пос}}$ – посадочная скорость ЛА, м/с; $t_{\text{разб}}$ – время разбега ЛА, с; $t_{\text{пр}}$ – время пробег ЛА, с.

Угловое ускорение колеса ε , определяются из выражения:

$$\varepsilon = \frac{a_{\text{ЛА}}}{R}. \quad (4)$$

Скорость ПП в переносном движении определяется, как:

$$\vec{V}_{\text{пер}} = \vec{V}_{\text{ЛА}} + \vec{V}'_{\text{пер}}, \quad (5)$$

где $\vec{V}'_{\text{пер}}$ – скорость вращательного движения относительно оси колеса, направлена перпендикулярно к радиусу.

Величина скорости вращательного движения относительно оси колеса определяется из выражения:

$$V'_{\text{пер}} = \omega \cdot R. \quad (6)$$

При этом, $\vec{V}'_{\text{пер}} \perp AP$, где AP отрезок, соединяющий точку на колесе с мгновенным центром скоростей. Тогда справедлива запись:

$$V_{\text{пер}} = \omega \cdot AP. \quad (7)$$

Отрезок AP определяется из геометрических соображений (по теореме косинусов):

$$AP^2 = OP^2 + OA^2 - 2 \cdot OP \cdot OA \cdot \cos \alpha = 4 \cdot R^2 \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2}.$$

В результате:

$$AP = 2 \cdot R \cdot \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (8)$$

После подстановки полученных значений в выражение (7), величина скорости ПП в переносном движении определяется, как:

$$V_{\text{пер}} = \frac{V_{\text{ЛА}}}{R} \cdot 2 \cdot R \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = 2 \cdot V_{\text{ЛА}} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (9)$$

Анализ выражение (9) показывает, что скорость ПП в переносном движении зависит от скорости ЛА $V_{\text{ЛА}}$ и угла α , который определяет место отделения ПП от поверхности колеса.

Для определения относительной скорости движения ПП в материале протектора шины и места его выхода из контакта с колесом, необходимо определить ускорение ПП в сложном движении $\vec{a}_{\text{ПП}}$.

Согласно законам классической механики, ускорение ПП в сложном движении определяется, как:

$$\vec{a}_{\text{ПП}} = \vec{a}_{\text{отн}} + \vec{a}_{\text{пер}} + \vec{a}_{\text{кор}}, \quad (10)$$

где $\vec{a}_{\text{отн}}$ – ускорение ПП в относительном движении; $\vec{a}_{\text{пер}}$ – ускорение ПП в переносном движении; $\vec{a}_{\text{кор}}$ – ускорение Кориолиса.

Схема ускорений, действующих на ПП, представлена на рисунке 2.

Направление ускорения Кориолиса выбирается по правилу Н.Е. Жуковского [10] и определяется, как $\vec{a}_{\text{кор}} = 2 \cdot \vec{\omega} \times \vec{V}_{\text{отн}}$.

Для рассматриваемого случая числовое значение ускорения Кориолиса определяется, как:

$$a_{\text{кор}} = 2 \cdot \omega \cdot V_{\text{отн}} = 2 \cdot \frac{V_{\text{ЛА}} \cdot V_{\text{отн}}}{R}. \quad (11)$$

Ускорение ПП в переносном движении $\vec{a}_{\text{пер}}$ для рассматриваемого случая определяется, как:

$$\vec{a}_{\text{пер}} = \vec{a}_{\text{ЛА}} + \vec{a}_{\text{пер}}^{\tau} + \vec{a}_{\text{пер}}^n,$$

где $\vec{a}_{\text{ЛА}}$ – ускорение поступательного движения ЛА; $\vec{a}_{\text{пер}}^{\tau}$ и $\vec{a}_{\text{пер}}^n$ – ускорения ПП в переносном движении.

Величина ускорения $\vec{a}_{\text{пер}}^{\tau}$ определяется, как:

$$a_{\text{пер}}^{\tau} = R \cdot \varepsilon. \quad (12)$$

Величина ускорения $\vec{a}_{\text{пер}}^n$ определяется, как:

$$a_{\text{пер}}^n = R \cdot \omega^2 = \frac{V_{\text{ЛА}}^2}{R}. \quad (13)$$

Вычисления показывают, что величина $a_{\text{пер}}^{\tau}$ по сравнению с другими ускорениями невелика, поэтому в расчетах его значением можно пренебречь.

Для определения относительного ускорения и относительной скорости ПП до момента потери контакта с поверхностью шины, необходимо записать основной закон динамики с учетом выражения (10). Для сложного движения ПП основной закон динамики запишется, как:

$$m_{\text{ПП}} \cdot (\vec{a}_{\text{отн}} + \vec{a}_{\text{пер}} + \vec{a}_{\text{кор}}) = \sum \vec{F}_k, \quad (14)$$

где $\sum \vec{F}_k$ – сумма сил, действующих на ПП.

Для относительного движения выражение запишется следующим образом:

$$m_{\text{ПП}} \cdot \vec{a}_{\text{отн}} = \sum \vec{F}_k + (-m_{\text{ПП}} \cdot \vec{a}_{\text{пер}}) + (-m_{\text{ПП}} \cdot \vec{a}_{\text{кор}}), \quad (15)$$

где $-m_{\text{ПП}} \cdot \vec{a}_{\text{пер}} = \vec{F}_{\text{пер}}^{\text{ин}}$ – сила инерции в переносном движении;

$-m_{\text{ПП}} \cdot \vec{a}_{\text{кор}} = \vec{F}_{\text{кор}}^{\text{ин}}$ – Кориолисова сила инерции.

Тогда справедлива запись:

$$m_{\text{ПП}} \cdot \vec{a}_{\text{отн}} = \sum \vec{F}_k + \vec{F}_{\text{пер}}^{\text{ин}} + \vec{F}_{\text{кор}}^{\text{ин}}. \quad (16)$$

Таким образом, при описании относительного движения ПП, к действующим на него силам необходимо добавить силы инерции, которые направлены против соответствующих ускорений (рис. 3).

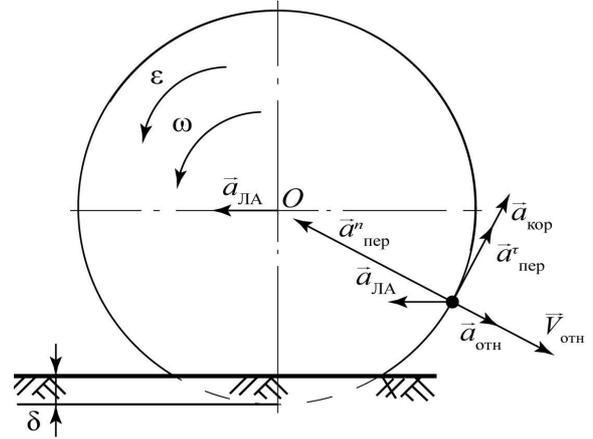


Рис. 2. Схема ускорений, действующих на ПП

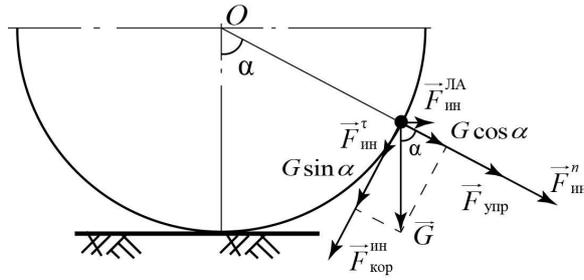


Рис. 3. Схема сил, действующих на ПП в относительном движении

Анализ схемы сил, представленной на рисунке 3, позволяет сделать вывод о том, что на ПП действуют: $G = mg$ – сила тяжести; $\vec{F}_{упр}$ – сила упругости, действующая на ПП в результате его погружения в материал протектора шины; $\vec{F}_{ин}^{ЛА} = -m_{ПП} \cdot \vec{a}_{ЛА}$ – сила инерции при поступательном движении ЛА (разгон при взлете, торможение при посадке); $\vec{F}_{ин}^{\tau} = -m_{ПП} \cdot \vec{a}_{ин}^{\tau}$ – касательная сила инерции вращательного движения; $\vec{F}_{ин}^n = -m_{ПП} \cdot \vec{a}_{ин}^n$ – центробежная сила инерции; $\vec{F}_{ин}^{кор} = -m_{ПП} \cdot \vec{a}_{кор}^{ин}$ – Кориолисова сила инерции.

Как отмечено в работе [1] $\vec{F}_{ин}^{ЛА}$ пренебрежительно мала, а составляющая силы тяжести $G \sin \alpha$ и $\vec{F}_{кор}^{ин}$ не могут вызвать перемещение ПП, в результате их воздействия происходит удержание ПП в материале протектора за счет увеличения прижимного усилия в месте его контакта с шиной.

Основной закон динамики в этом случае запишется, как:

$$m_{ПП} \cdot a_{отн} = m_{ПП} \cdot \frac{dV_{отн}}{dt} = m_{ПП} \cdot g \cdot \cos \alpha + F_{упр} + F_{пер}^n, \quad (17)$$

где α – центральный угол, определяющий место выхода ПП из контакта с поверхностью шины, град.

Упругая сила выталкивания, действующая на ПП со стороны материала протектора шины, определяется, как:

$$F_{упр} = K \cdot (d_{ПП} - S), \quad (18)$$

где K – коэффициент жесткости материала протектора шины, зависит от размера ПП (определяется эмпирическим путем), кг/с²; $d_{ПП}$ – эквивалентный диаметр, характеризующий размер ПП одним числовым значением, м; S – расстояние, которое проходит ПП в материале протектора шины до момента выхода из контакта с ним, м.

С учетом выражений (13) и (18) дифференциальное уравнение относительного движения ПП (17) запишется, как:

$$m_{ПП} \cdot \frac{dV_{отн}}{dt} = m_{ПП} \cdot g \cdot \cos \alpha + K \cdot (d_{ПП} - S) + m_{ПП} \cdot \frac{V_{ЛА}^2}{R}. \quad (19)$$

В результате умножения обеих частей выражения (19) на dS и деления на $m_{ПП}$, а также преобразования, оно запишется в виде интеграла, как (т.к. $\frac{dS}{dt} = V_{отн}$):

$$\int V_{отн} \cdot dV_{отн} = \int g \cdot \cos \alpha \cdot dS + \int \frac{K}{m_{ПП}} \cdot d_{ПП} \cdot dS - \int \frac{K}{m_{ПП}} \cdot S \cdot dS + \int \frac{V_{ЛА}^2}{R} \cdot dS. \quad (20)$$

В результате решения интеграла (20), при условии того, что к моменту выхода ПП из контакта с колесом $S = d_{ПП}$, числовое значение относительной скорости ПП $V_{отн}$ определится, как:

$$V_{отн} = \sqrt{2 \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot d_{ПП} + 2 \cdot \frac{K}{m_{ПП}} \cdot d_{ПП}^2 - \frac{K}{m_{ПП}} \cdot d_{ПП}^2 + 2 \cdot \frac{V_{ЛА}^2}{R} \cdot d_{ПП}}. \quad (21)$$

Для вычисления угла, определяющего место выхода ПП из контакта с поверхностью колеса, необходимо знать время нахождения его в материале протектора шины.

Так как, $V_{\text{отн}} = \frac{dS}{dt}$ из выражения (19) следует, что:

$$dt = \frac{dS}{\sqrt{2 \cdot \left(g \cdot \cos \alpha + \frac{K}{m_{\text{ПП}}} \cdot d_{\text{ПП}} + \frac{V_{\text{ЛА}}^2}{R} \right) \cdot S - \frac{K}{m_{\text{ПП}}} \cdot S^2}} \quad (22)$$

После преобразования и интегрирования выражения (22) время нахождения ПП в материале протектора шины определится, как:

$$t = \frac{2}{\sqrt{\frac{K}{m_{\text{ПП}}}}} \cdot \arcsin \sqrt{\frac{K \cdot d_{\text{ПП}}}{m_{\text{ПП}} \cdot 2 \cdot \left(g \cdot \cos \alpha + \frac{K \cdot d_{\text{ПП}}}{m_{\text{ПП}}} + \frac{V_{\text{ЛА}}^2}{R} \right)}} \quad (23)$$

Положение точки отделения ПП от поверхности колеса определяется значением центрального угла α (рис. 4), который находится, как:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2, \quad (24)$$

где α_1 – угол между плоскостью перпендикулярной к опорной поверхности, проходящей через центральную ось колеса и местом начала выхода ПП из контакта с опорной поверхностью, град; α_2 – угол на который поворачивается колесо от момента начала выталкивания ПП до полного выхода из контакта с ним, определяется в зависимости от размера колеса и скорости движения ЛА, град.

Значение угла α_1 определяется, как:

$$\alpha_1 = \arccos \left(1 - \frac{\delta}{R} \right), \quad (25)$$

где δ – обжатие шины, м.

Угол α_2 определяется, как угол, на который поворачивается колесо за время выхода ПП из материала шины.

$$\alpha_2 = \omega \cdot t = \frac{V_{\text{ЛА}}}{R} \cdot t. \quad (26)$$

Координаты ПП в плоскости симметрии колеса определяются из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + R \cdot \sin \alpha; \\ y &= y_0 + R(1 - \cos \alpha), \end{aligned} \quad (27)$$

где x_0, y_0 – координаты центра колеса, м.

После определения начальных условий движения ПП, а именно относительной скорости и угла, определяющего место выхода ПП из контакта с колесом, необходимо рассчитать абсолютную скорость ПП.

Расчётная схема представлена на рисунке 5.

Для расчета траектории ПП, в качестве исходных данных, необходимо знать его скорость и осевой угол вылета $\varphi_{\text{ос}}$. Если ПП движется в плоскости параллельной плоскости симметрии ЛА, значение $\varphi_{\text{ос}}$ равно значению начального угла наклона траектории Θ .

Проекции скоростей (относительной и переносной) ПП на оси координат представлены следующими выражениями:

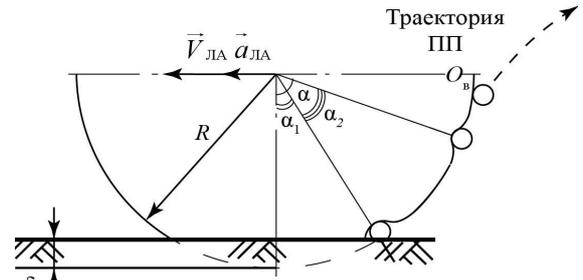


Рис. 4. К вопросу определения места отделения ПП от поверхности шины

$$\begin{aligned}
V_{отн_x} &= -V_{отн} \cdot \cos(90 - \alpha) = -V_{отн} \cdot \sin \alpha; \\
V_{отн_y} &= -V_{отн} \cdot \sin(90 - \alpha) = -V_{отн} \cdot \cos \alpha; \\
V_{пер_x} &= V_{пер} \cdot \cos \frac{180 - \alpha}{2} = V_{пер} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}; \\
V_{пер_y} &= V_{пер} \cdot \sin \frac{180 - \alpha}{2} = V_{пер} \cdot \cos \frac{\alpha}{2}.
\end{aligned}
\tag{28}$$

Проекции абсолютной скорости ПП на оси координат определяются, как:

$$\begin{aligned}
V_{ПП_x} &= V_{пер_x} + V_{отн_x}; \\
V_{ПП_y} &= V_{пер_y} + V_{отн_y}.
\end{aligned}
\tag{29}$$

Абсолютная скорость ПП определяется, как:

$$V_{ПП} = \sqrt{V_{ПП_x}^2 + V_{ПП_y}^2}.
\tag{30}$$

Так как, $\cos \varphi_{ос} = \frac{V_{ПП_x}}{V_{ПП}}$ (рис. 5), то значение

осевого угла вылета $\varphi_{ос}$ определяется, как:

$$\varphi_{ос} = \arccos \frac{V_{ПП_x}}{V_{ПП}}.
\tag{31}$$

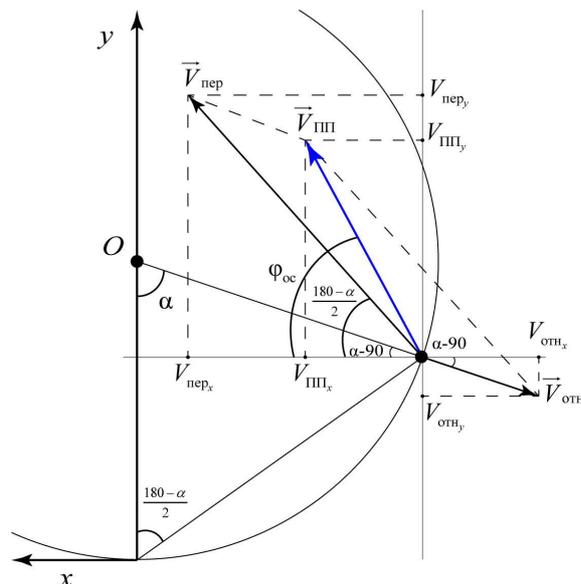


Рис. 5. К вопросу определения абсолютной скорости ПП

Выводы. Таким образом, разработана математическая модель движения постороннего предмета, вылетающего из-под колеса шасси летательного аппарата. Применение модели позволяет определить начальные условия движения ПП в момент его отделения от поверхности колеса шасси, а именно, абсолютную скорость ПП и координаты места отделения ПП, что существенно расширяет возможности использования методик оценки защищенности СУ от воздействия ПП вылетающих из-под колес шасси.

Список литературы

1. Комов А.А. Теоретические основы и технические решения для защиты авиационных двигателей от попадания твердых посторонних предметов с поверхности аэродрома: дисс. ... докт. техн. наук: 05.26.02 / Комов Алексей Алексеевич. – М., 2005. – 400 с.
2. Ващенко Н.В., Розенфельд И.А. Оценка оптимальности разрабатываемых методов защиты для различных объектов и условий их применения // Материалы 3-й НТК по проблемам защиты авиационных двигателей от повреждения их посторонними предметами, птицами, водой, песком и пылью. – Жуковский, 1985. – С. 26-35.
3. Горский А.Н., Евдокимов А.И. Исследования ударного воздействия лопастей ЛБВ1 воздушных винтов АВ-140 с посторонними предметами // Конструкция и системы управления ГТД: Сб. науч. – методических материалов. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2007. – С. 24-33.
4. Дедеш В.Т., Боцьковский А.М., Розенфельд И.А. Сравнительный анализ защищенности газотурбинных двигателей от повреждений посторонними предметами с поверхности аэродрома на различных летательных аппаратах // Материалы 5-й межведомственной НТК по проблемам защиты газотурбинных двигателей от повреждений посторонними предметами. – М.: ЛИИ им. М.М. Громова, 1993. – С. 7-20.
5. Евдокимов А.И. Обоснование выбора эффективных систем защиты от повреждений посторонними предметами двигателей самолётов военного назначения: дисс. ... докт. техн. наук: 05.07.05 / Евдокимов Алексей Иннокентьевич. – М., 1993. – 520 с.
6. Комов А.А., Юрин С.П. Уровень защищенности авиационных двигателей отечественных воздушных судов от повреждений посторонними предметами // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2014. – № 4(315). – С. 42-48.
7. Марков Д.С., Нескоромный Е.В. Методика определения живучести и стойкости воздушных винтов летательных аппаратов к ударному воздействию посторонних предметов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – №10. – С. 93-102. – DOI: 10.18698/0536-1044-2019-10-94-102.
8. Natan R.H. Inlet vortex formation under crosswind conditions. Worcester Polytechnic Institute in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering, 2013. 133 p.
9. Марков Д.С., Евдокимов А.И., Нескоромный Е.В. Экспериментальная установка для проведения специальных испытаний по оценке повреждаемости элементов авиационных силовых установок посторонними предметами // Насосы. Турбины. Системы. – 2017. – №4(25). – С. 35-42.

10. Жуковский Н.Е. Теоретическая механика. – М.: ГИТТЛ, 1952. – 812 с.

References

1. Komov A.A. Theoretical foundations and technical solutions for the protection of aircraft engines from the ingress of solid foreign objects from the surface of the airfield: diss. ... doct. of tech. sc.: 05.26.02 / Komov Alexey Alekseevich. – M., 2005. – 400 p.
2. Vashchenko N.V., Rosenfeld I.A. Estimation of the optimality of the developed protection methods for various objects and conditions of their application // Proceedings of the 3rd Scientific and Technical Committee on the problems of protecting aircraft engines from damage by foreign objects, birds, water, sand and dust. – Zhukovsky, 1985. – P. 26-35.
3. Gorsky A.N., Evdokimov A.I. Impact studies of LBV1 blades of AB-140 propellers with foreign objects // Design and control systems of gas turbine engines: Sat. scientific – teaching materials. – M.: VVIA n.a. prof. N.E. Zhukovsky, 2007. – P. 24-33.
4. Dedesh V.T., Botskovsky A.M., Rosenfeld I.A. Comparative analysis of the protection of gas turbine engines from damage by foreign objects from the surface of the airfield on various aircraft // Materials of the 5th Interdepartmental Scientific and Technical Committee on the problems of protecting gas turbine engines from damage by foreign objects. – M.: LII n.a. M.M. Gromov, 1993. – P. 7-20.
5. Evdokimov A.I. Substantiation of the choice of effective systems for protection against damage by foreign objects of engines of military aircraft: diss. ... doct. of tech. sc.: 05.07.05 / Evdokimov Alexey Innokent'evich. – M., 1993. – 520 p.
6. Komov A.A., Yurin S.P. The level of protection of aircraft engines of domestic aircraft from damage by foreign objects // Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation. 2014, no. 4(315), pp. 42-48.
7. Markov D.S., Neskromny E.V. Method for determining the survivability and resistance of aircraft propellers to the impact of foreign objects // News of higher educational institutions. Mechanical Engineering. 2019, no. 10, pp. 93-102. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-10-94-102.
8. Natan R.H. Inlet vortex formation under crosswind conditions. Worcester Polytechnic Institute in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering, 2013. 133 p.
9. Markov D.S., Evdokimov A.I., Neskromny E.V. Experimental setup for carrying out special tests to assess the damageability of elements of aircraft power plants by foreign objects // Pumps. Turbines. Systems. 2017, no. 4(25), pp. 35-42.
10. Zhukovsky N.E. Theoretical mechanics. – M.: GITTL, 1952. – 812 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Марков Данил Сергеевич – кандидат технических наук, преподаватель кафедры авиационных двигателей	Markov Danil Sergeevich – candidate of technical sciences, lecturer of the Department of aircraft engines
Нескоромный Евгений Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры авиационных двигателей	Neskromniy Evgeniy Vyacheslavovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of aircraft engines
Чернопятова Светлана Александровна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры общепрофессиональных дисциплин svvetkas@gmail.com	Chernopyatova Svetlana Aleksandrovna – candidate of technical sciences, senior lecturer of the Department of general professional disciplines

Получена 02.04.2023